

电动执行机构在高温高压工况下的可靠性分析与改进

李志刚

罗托克贸易（上海）有限公司 上海

【摘要】电动执行机构在高温高压环境中长期运行时，面临着材料性能退化、密封失效及控制系统异常等多重挑战，导致其可靠性显著下降。本文通过分析高温高压工况对电动执行机构关键部件的影响机制，结合实验与仿真数据，揭示其失效模式及主要原因。在此基础上，提出针对性的结构优化和材料改进方案，显著提升设备的耐高温和耐高压性能。研究结果为电动执行机构的设计改进和安全运行提供了理论依据和技术支持，具有重要的工程应用价值。

【关键词】电动执行机构；高温高压；可靠性分析；结构改进；材料优化

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250120

Reliability analysis and improvement of electric actuators under high-temperature and high-pressure conditions

Zhigang Li

Rotork Trading (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai

【Abstract】 When electric actuators operate for a long time in high-temperature and high-pressure environments, they face multiple challenges such as material performance degradation, seal failure, and abnormal control systems, which lead to a significant decline in their reliability. By analyzing the impact mechanism of high-temperature and high-pressure conditions on key components of electric actuators, and combining experimental and simulation data, this paper reveals their failure modes and main causes. On this basis, targeted structural optimization and material improvement schemes are proposed, which significantly enhance the high-temperature and high-pressure resistance of the equipment. The research results provide a theoretical basis and technical support for the design improvement and safe operation of electric actuators, and have important engineering application value.

【Keywords】 Electric actuator; High-temperature and high-pressure; Reliability analysis; Structural improvement; Material optimization

引言

电动执行机构作为工业自动化控制系统中的关键执行单元，其性能稳定性直接关系到整个系统的安全运行。高温高压工况是许多工业领域常见的严苛环境，对电动执行机构的材料强度、密封性能及电气元件带来了极大考验。当前，传统电动执行机构在此类工况下容易出现故障，影响设备的正常使用寿命和安全性。深入分析电动执行机构在高温高压环境下的失效机制，探讨其可靠性影响因素，并提出有效的改进措施，是保证工业生产安全和提高设备性能的关键。本文将结合实验研究和理论分析，系统阐述电动执行机构在高温高压条件下的性能表

现及优化路径，旨在为相关设备的设计改进提供科学参考。

1 电动执行机构在高温高压工况下的失效机理分析

电动执行机构在高温高压环境中运行时，内部材料和结构面临的应力以及热负荷显著增加，这种复杂的工况加剧了设备性能的不可逆退化。高温环境使得金属零部件的机械强度明显下降，塑料和橡胶密封件的弹性和耐磨性能也大幅减弱，导致密封效果降低。电气绝缘材料的电阻率降低，使得电气系统的绝缘性能下降，增加了故障风险。这些因素共同加速了设备的老化过程。高压条件导致机械结

构产生变形,密封系统容易受到破坏,成为设备失效的关键诱因。反复的热循环还引发不同材料间热膨胀差异,导致连接部位产生微裂纹和接触不良,进一步影响设备的整体稳定性和正常运行,增加了维修难度和运行风险。

热力学和材料学的结合研究表明,电动执行机构的失效多发生在轴承、密封圈、齿轮传动机构及电机绕组等关键部位。温度超标导致润滑油脂黏度下降,润滑效果变差,促进机械磨损的加剧。高压环境下,密封系统承受极大压差,微小缺陷扩大成为泄漏路径,导致内部环境污染或介质泄露,降低系统密封性和响应速度。电机部分的绕组绝缘材料在热和电压应力共同作用下逐渐失效,造成绝缘击穿风险上升^[1]。电动执行机构失效过程表现出复杂的多因素耦合作用,不仅包括机械疲劳、热疲劳和材料老化,还有环境介质的腐蚀影响和电磁干扰的叠加。高温高压环境强化了这些因素的交互作用,缩短了设备的设计寿命。深入理解这些失效机理,有助于准确识别关键影响因素,为后续的可靠性提升和结构优化奠定理论基础,从而提升电动执行机构的整体性能稳定性。

2 关键部件的可靠性影响因素研究

关键部件作为电动执行机构的核心模块,其性能表现直接影响整个设备的可靠性和运行稳定性。电机、传动装置以及密封系统构成了设备的关键功能单元,各部分的材料选用和制造工艺对其在高温高压环境下的适应能力起着决定性作用。电机绕组的绝缘等级是保障电机在高温条件下稳定运行的关键,绝缘材料的耐热性能和散热设计直接关系到绕组的温度控制。如果绕组温度超过设计极限,绝缘材料会加速老化,甚至可能导致绝缘击穿和短路故障,严重威胁设备安全。传动机构的齿轮部分,材料的硬度和韧性是影响其耐磨性和抗疲劳性能的关键因素,若选材不当或润滑不充分,齿面极易发生磨损和疲劳裂纹,降低传动效率,缩短使用寿命。润滑系统的有效性在高温高压条件下尤为重要,润滑油的热稳定性和抗氧化性能直接影响机械部件的磨损程度和故障频率,从而影响设备整体的可靠运行。

密封系统的性能在高压工况中尤为重要,常用的橡胶密封件在高温条件下易发生硬化和变形,导致密封失效。选择耐高温、耐腐蚀的密封材料,以及优化密封结构设计,可以有效提升系统的密封性能,

避免介质泄露。轴承作为承受径向和轴向载荷的关键部件,其润滑状态和材料性能对整体稳定性具有决定性影响。高温会导致润滑剂分解和润滑膜破坏,增加摩擦和磨损,进而导致轴承早期失效。环境因素同样影响关键部件的可靠性。高温高压环境常伴随介质腐蚀性增强,尤其是含有腐蚀性气体或液体时,材料的腐蚀速率显著上升^[2-6]。电动执行机构的表面保护涂层和防腐蚀处理技术成为提升寿命的重要措施。控制电气元件的工作环境,防止潮气和灰尘侵入,也是保证设备稳定运行的关键环节。综合考虑上述因素,关键部件的可靠性提升需要多角度、多层次的技术措施支持。

3 结构优化与材料改进方案设计

针对电动执行机构在高温高压工况下存在的可靠性瓶颈,结构优化成为提升整体性能的重要突破口。设计阶段必须充分考虑热应力在壳体及关键连接部件上的合理分布,避免局部应力集中导致结构疲劳和裂纹产生。优化壳体结构不仅包括形状和厚度的调整,还需关注连接方式的合理性和材料的匹配性。通过采用有限元分析(FEA)等先进仿真技术,能够精准模拟设备在复杂工况下的受力状态与变形趋势,为设计改进提供科学依据。这种基于仿真的设计优化手段能够在虚拟环境中预测潜在弱点,有效指导结构调整。密封系统作为电动执行机构的重要组成部分,其结构同样需要优化。密封槽的设计要兼顾密封件的弹性恢复能力和耐压性能,复合密封材料的引入显著提升了密封系统对高温高压的适应性,减少泄漏风险,保障系统的密封完整性和工作稳定性。

材料的选择对电动执行机构在高温高压环境中的性能表现至关重要。提升耐高温性能需采用具备高热稳定性和机械强度的材料组合。高温合金因其优异的耐热性能和抗氧化能力被广泛应用于关键部件的制造。耐热复合材料的应用能够减轻重量的同时提升结构的整体稳定性。密封件常用的改性聚四氟乙烯材料,在耐热及耐腐蚀方面表现优异,有效延长密封寿命。电机绕组的绝缘系统通过使用高耐热等级的环氧树脂和玻璃纤维增强材料,大幅提升了绝缘强度和热稳定性,从根本上延长了电机的使用寿命。润滑剂的选用同样影响设备的机械可靠性,高温工况下,合成润滑油脂具备优异的耐热和抗氧化性能,能够保持润滑膜的完整性,降低机械磨损和热疲劳,从而有效延长轴承及齿轮的使用周期。

结构改进与材料选择应作为一个整体进行系统协同推进,动态适应实际运行工况的需求。在设计理念上,采用模块化设计能够简化设备维护流程,使关键部件的更换和升级更加便捷,降低整体维护成本。模块化设计还便于实现标准化和规模化生产,提高制造效率。结合现代智能监测技术,可实现对设备关键参数如温度、压力、振动及电流的实时监控,及时发现潜在故障隐患^[7]。监测数据通过反馈机制指导结构和材料的持续改进,实现设计的动态优化。此举不仅显著提升了电动执行机构的可靠性,还增强了其在复杂高温高压环境中的适应性和安全保障能力,为工业自动化系统的稳定运行提供了坚实保障。

4 高温高压环境下电动执行机构性能验证与效果评估

设计改进后的电动执行机构必须经过一系列严密的性能验证,以确保其在高温高压工况下能够稳定运行。性能测试不仅涵盖高温老化试验,还包括压力耐受测试和机械疲劳试验,这些测试能够较真实地模拟设备在实际工况中的运行环境。高温老化试验考察材料及结构在长时间热应力作用下的稳定性,而压力耐受测试则验证设备在高压环境下的密封和结构承受能力。机械疲劳试验则评估执行机构在反复负载作用下的耐久性。测试过程中,监控温度分布、电机电流变化、输出扭矩稳定性以及密封泄漏率等关键参数,能够有效判定设备性能是否达到预设指标,确保其具备满足工业要求的可靠性。

通过对实验数据与数值仿真结果的结合分析,能够深入评估结构优化和材料改进的实际效果。对比改进前后的性能试验数据,能够客观量化设备在耐热性、耐压性及机械强度等方面的提升。关注设备的失效频率和运行波动性变化,可以反映改进方案对抑制关键失效机理的成效。寿命延长的表现是验证优化设计是否达到预期目标的重要指标。长期运行监测则为设备在真实高温高压条件下的耐久性提供了可靠依据,确保设备能够持续稳定地完成预期任务,避免因环境恶劣导致的突发性故障。综合多项性能评估结果为电动执行机构在高温高压环境中的设计改进提供了科学、系统的依据。通过验证流程中发现的不足,能够及时调整设计方案,形成有效的闭环优化机制,推动技术持续完善^[8]。改进后的设备在实际工业应用中表现出较低的故障率和更

高的运行效率,有效提升了系统的安全稳定性。这种性能优良的电动执行机构为工业自动化领域提供了坚实的技术保障,促进相关生产过程的自动化和智能化升级,提升整体装备的运行质量和经济效益。

5 结语

电动执行机构在高温高压工况下的可靠性直接关系到工业自动化系统的安全与稳定。通过深入分析其失效机理,识别关键部件的可靠性影响因素,并实施结构优化与材料改进,有效提升了设备的耐热耐压性能。结合严格的性能验证和长期监测,确保改进方案的实用性与可靠性。未来,持续推进智能监测与动态优化技术的应用,将进一步提升电动执行机构在复杂环境中的适应能力和寿命,为相关行业的高效、安全运行提供坚实保障。这不仅推动了设备技术的发展,也为工业自动化的高质量发展奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 陈铭杰,余炜,秦芹芹,等.纯电动汽车机械式自动变速器换挡执行机构的设计[J].机械制造,2025,63(06):4-7+23.
- [2] 史爱惠,王伟兵,李永华.川仪 RHA-M 系列智能电动执行机构在煤气加压中的应用[J].山西冶金,2025,48(05):258-260.
- [3] 方小明,孙飞,梁春.电动阀门执行机构驱动系统精密加工技术分析[J].中国机械,2025,(10):47-50.
- [4] 孟庆高.浅谈 Rotork 电动执行机构的检维修[C]//中国机电一体化技术应用协会.第八届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.浙江鼎盛石化工程有限公司,2025:545-548.
- [5] 陈雪琴.多回转大扭矩变频电动执行机构的设计[J].装备机械,2024,(04):59-61.
- [6] 曾海云,于海生,王晓洋,等.某系列电动执行机构阀位跳变故障的研究与处理[J].中国设备工程,2023,(S2):1-3.
- [7] 杨琦,朱涛涛,佟洁.核电站智能型电动执行机构数据库探索与运用[J].仪器仪表用户,2023,30(11):33-36+25.
- [8] 张天保,李诗然,陈力,等.应用于液体密封环境的电动执行机构设计[J].舰船科学技术,2023,45(19):35-39.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS